# 基于北京串列加速器的若干核物理实验研究

华 辉　叶沿林　杨晓菲
（北京大学 物理学院和核物理与核技术国家重点实验室　北京　100871）

**摘要**　原子核是主要由短程相互作用制约的量子复杂多体系统，储存着宇宙间绝大部分可见的质量和能量。对原子核的研究，近百年来对人类的生存发展和国家的地位与安全产生了重大影响。过去几十年，短寿命放射性原子核的奇特结构现象不断被揭示，打破了人们对原子核结构的经典认知，开启了不稳定核（放射性核）结构研究的新领域。北京串列加速器核物理国家实验室在过去30多年为我国低能核物理实验提供了基础平台。北京大学实验核物理团队长期以来发展特色实验设备，在北京HI-13串列加速器上完成了系列核物理实验，在原子核奇特结构研究中取得了一批重要成果。本文将介绍团队基于北京HI-13串列加速器开展的几项代表性工作，如基于在束γ谱学的$A = 70$质量区Ge同位素形状演化研究，基于直接核反应实验的轻丰中子核集团结构研究，以及基于北京放射性束装置发展的共线激光谱设备和首次在线激光核谱实验等。

**关键词**　不稳定原子核，奇特结构，核衰变，核反应，激光核谱
**中图分类号**　TL99
**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080004

## Advancements in nuclear physics research using Beijing HI-13 tandem accelerator

HUA Hui　YE Yanlin　YANG Xiaofei
(*School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract**　The atomic nucleus, governed by short-range nuclear force, is a quantum many-body system that plays a vital role in the visible energy-mass dynamics of the universe and significantly influences the sustenance, development of society, and the security of nations. There have been numerous discoveries in the past decades concerning exotic structures and properties of short-lived nuclei. These findings have sparked breakthroughs in our understanding of nuclear structures and have given rise to a new field called radioactive ion beam physics, which focuses on the study of unstable nuclei. For more than 30 years, the Beijing Tandem-Accelerator Nuclear-Physics National Laboratory has provided a basic research platform for low-energy nuclear physics experiments. The experimental nuclear physics team at Peking University has continuously developed a dedicated experimental apparatus, conducted a series of physics experiments at the Beijing HI-13 tandem accelerator, and achieved important results related to exotic nuclear structures. In this article, we present several notable experimental achievements of our team at the HI-13 accelerator. These include the investigation of the shape evolution of germanium isotopes (around $A$=70) using in-beam γ-spectroscopy, the exploration of cluster structures in light neutron-rich nuclei through

国家自然科学基金(No.12027809, No.U1967201, No.12035001)、国家重点研发计划(No.2022YFA1604800)资助
第一作者：华辉，男，1971年出生，1999年于北京大学获博士学位，教授，研究领域为粒子物理与原子核物理
通信作者：杨晓菲，E-mail：xiaofei.yang@pku.edu.cn
收稿日期：2023-06-09，修回日期：2023-07-03
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12027809, No. U1967201, No. 12035001), National Key R&D Program of China (No.2022YFA1604800)
First author: HUA Hui, male, born in 1971, graduated from Peking University with a doctoral degree in 1999, professor, focusing on particle physics and nuclear physics
Corresponding author: YANG Xiaofei, E-mail: xiaofei.yang@pku.edu.cn
Received date: 2023-06-09, revised date: 2023-07-03

direct nuclear reactions, and the development and commissioning of collinear laser spectroscopy experiments at the Beijing Radioactive Ion-beam Facility.

**Key words**　Unstable nuclei, Exotic structure, Nuclear decay, Nuclear reaction, Collinear laser spectroscopy



原子核是由短程相互作用制约的量子多体复杂系统，实验上需要多种技术进行多角度观察，理论上需要多种模型来描写。不稳定原子核的结构更加丰富，如晕结构、集团结构、软巨共振、新幻数与壳演化、奇特形变和形状共存等。放射性核束物理是对大片未知核素版图的开拓，有广阔的创新机遇和潜在的多方面应用，是国际上核物理基础研究的前沿热点之一[1-3]。为此，世界各科技大国均在重点部署用于不稳定原子核产生和研究的放射性核束(Radioactive Ion Beam，RIB)装置，如瑞士欧洲核子中心的ISOLDE (Isotope Separator On-Line Device)[4]、日本理化学研究所的RIBF(Radioactive Isotope Beam Factory)[5]、美国密歇根州立大学的FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)[6]、德国重离子研究中心的FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)[7]、中国科学院近代物理研究所的HIAF(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility)[8-9]等。未来几十年，更多远离β稳定线的丰中子/丰质子核素将被产生，为不稳定核性质和奇特结构研究提供基础条件。

北京串列加速器核物理国家实验室作为我国核物理研究的重要基地之一，为我国实验核物理的研究提供了平台。近几年，新建成的北京放射性核束装置(Beijing Radioactive Ion-beam Facility，BRIF)[10]已经可以为终端实验用户提供多种轻质量区不稳定核束。北京大学实验核物理团队多年来发展各类先进探测技术，有三个课题组分别基于核衰变、核反应和原子核基本性质测量等在北京HI-13串列加速器上开展实验研究，取得了一批重要成果，培养了大批人才。代表性的工作包括：1)基于串列加速器上的在束γ谱学终端开展了中等质量区原子核结构演化的研究，例如70质量区原子核的三轴形变和“订书机带”等[11-12]；发展了相关的探测设备和数字化获取系统，为多家用户成功使用[13-14]。2)基于串列加速器上的核反应实验开拓了丰中子核集团结构研究新方向，在$^{14}$C的链状分子态、$^{10}$Be的近阈分子结构和$^{18}$O中的非对称分子结构等方面取得重要进展[15-17]；发展了相关探测设备。3)基于北京放射性核束BRIF装置发展了国内首个针对不稳定核基本性质研究的共线激光谱系统，完成国内首次在线不稳定核激光核谱实验，为我国不稳定核性质和结构研究带来新的机遇[18-20]。

## 1　70质量区Ge同位素形状演化研究

原子核形状一直是原子核结构研究中的一个重要课题。由于原子核具体的形状特性是原子核内部集体运动和单粒子运动相互竞争和平衡的结果，因此对原子核形状的研究对于我们了解原子核内部结构特点是非常重要的，一直受到理论和实验工作者的关注，取得了很多重要的研究成果[21-24]。

对于$Z$=28~36、$A$≈70质量区的原子核，由于它们核子费米面附近的单粒子能级轨道在长椭和扁椭形变区都有着较大的能级间隙(图1)，这些原子核展现出了丰富多变的形状特性。例如：对于Ge同位素，如图2所示，研究发现，$^{70}$Ge的基态具有一个近球形的扁椭形变，而$^{72,74,76}$Ge的基态具有长椭形变。Ge同位素的基态在$^{70}$Ge和$^{72}$Ge之间发生了形状相变[26-31]。对于Se和Kr同位素，与Ge同位素很类似，人们发现Se同位素基态形状在$^{72}$Se和$^{74}$Se之间，Kr同位素基态形状在$^{72}$Kr和$^{74}$Kr之间，也分别发生了从扁椭到长椭的形状相变。此外如图2所示，研究发现，在这些位于形状相变区的原子核中，很多核有着与其基态形状完全不同的激发$0^+$态结构，存在着普遍的形状共存现象。对这些核激发态结构的研究发现这些核的基态形状很不稳定，随着自旋的增加，很容易从一种形状演变到另一种形状。例如对$^{70,72}$Se和$^{72}$Kr核低激发态寿命的测量发现它们基态的扁椭形状在很低自旋时就变成了长椭；与此相反，$^{78}$Kr核随着自旋的增加，发生了从长椭到扁椭的形状相变。我们最近对$^{76}$Se核的研究中也发现了$^{76}$Se核形状随着自旋的增加由长椭到扁椭形状相变的实验证据[32]。

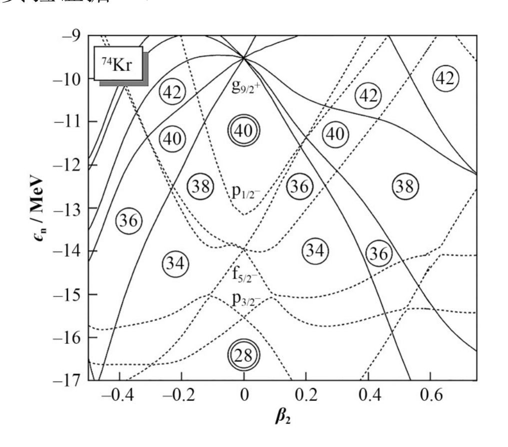



图1　中子Nilsson能级示意图[25]
Fig.1　Nilsson diagram for neutrons[25]

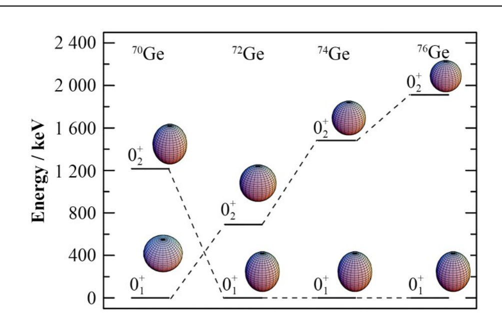



**图2** $^{70,72,74,76}$Ge的形状共存、形状相变示意图
**Fig.2** Shape coexistence and shape evolution for $^{70,72,74,76}$Ge

与此同时，研究显示，三轴自由度在这些位于形状相变区的原子核结构中也起着重要的作用。例如Toh等[33]在已有实验数据的基础上系统地研究了这个质量区偶偶原子核中三轴形变的特点，他们发现了一个很有意思的现象：这个质量区大部分偶偶原子核低激发态都具有较软的三轴形变，而$^{76}$Ge是目前已知在这个质量区中唯一一个低激发态具有较硬三轴形变的偶偶原子核。此外，由于$A$~70质量区原子核的质子一般占据$p_{3/2}$壳层，中子占据$g_{9/2}$壳层，$\Delta l=\Delta j=3$的$p_{3/2}$和$g_{9/2}$轨道间容易产生八极关联，理论预言这个质量区的原子核可能拥有稳定的八极形变。

如上所述，70质量区原子核丰富多变的形状特性为人们提供了一个了解原子核内部结构、验证和发展不同核结构模型的极好平台，为此，我们开展了对$^{71,73,74,75}$Ge同位素形状演化的系统研究。

我们在中国原子能科学研究院的HI-13串列静电加速器上分别利用重离子熔合蒸发反应$^{70}$Zn($^{7}$Li, 2np)$^{74}$Ge和$^{70}$Zn($^{7}$Li, 3np)$^{73}$Ge布居了$^{74}$Ge和$^{73}$Ge。在两轮实验中，入射束流$^{7}$Li的能量分别是30 MeV和35 MeV。在第一轮实验中，使用了12个带BGO($Bi_4Ge_3O_{12}$)反康的HPGe(High Purity Germanium)探测器探测γ射线，两台小平面探测器探测低能γ射线和X射线。在第二轮实验中使用了11个带BGO反康的HPGe探测器和两台小平面探测器。实验一共收集了2.0×10$^{8}$个二重符合事件，建立了对称的γ-γ符合矩阵。实验推高了$^{74}$Ge中已知的晕带，新发现了5条带结构，特别是其中对$^{74}$Ge三轴形变研究非常关键的γ带。在$^{73}$Ge中推高了已知的$f_{5/2}^{-1}$负宇称带，并新建立了一条$g_{9/2}$正宇称退耦合带。

使用基于协变密度泛函理论的五维集体哈密顿量模型(Five-Dimensional Collective Hamiltonian, 5DCH)对$^{72,74,76,78}$Ge的γ带结构特点开展了系统研究(图3)。理论很好地重现了实验结果，首次发现了Ge同位素链中原子核三轴形变随自旋和中子数变化的演化规律。我们的研究表明，$^{74}$Ge是Ge同位素链中原子核三轴形变从软到硬演化路径中的一个关键核素[11]。

推转壳模型的计算显示，$^{74}$Ge晕带在0.53 MeV处的回弯系$(\nu g_{9/2})^2$顺排导致的，这与Ge同位素的系

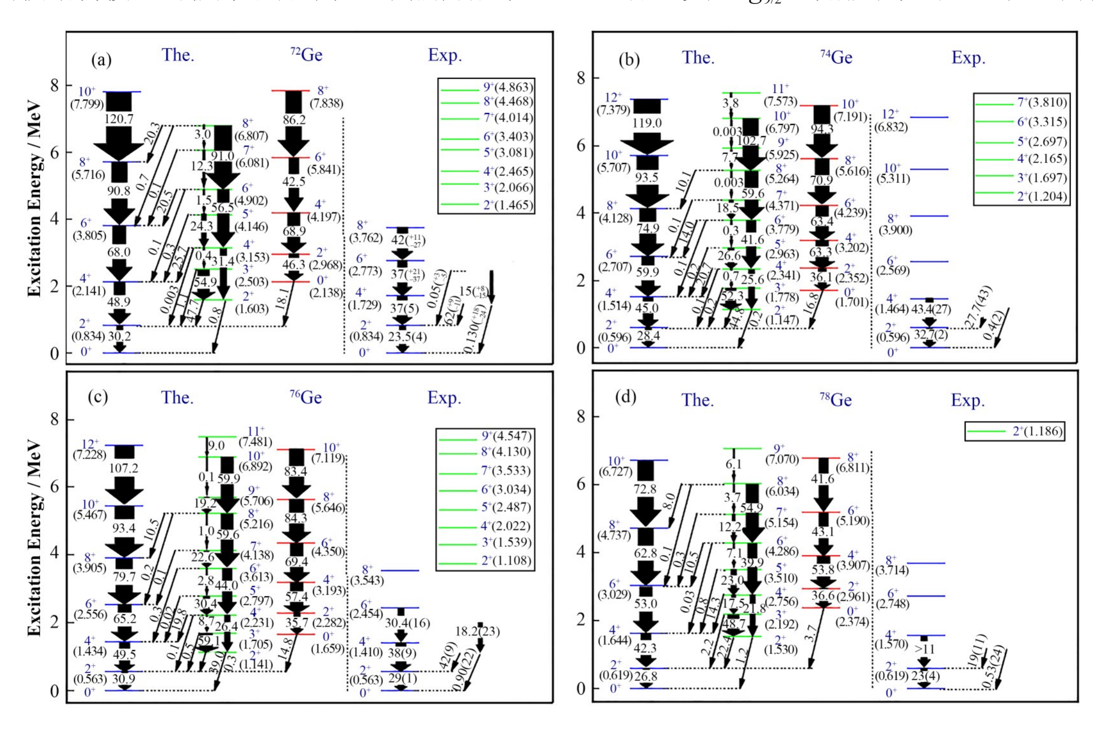



**图3** 5DCH计算的$^{72,74,76,78}$Ge基态带、γ带、β带能级和带内、带间B($E$2)值与实验结果的比较[11]
**Fig.3** The calculated excitation energies (in MeV) and the intraband and interband B($E$2) values (in W.u.) of the ground-state bands, γ- and β- bands in $^{72,74,76,78}$Ge isotopes by 5DCH model compared with the experimental data[11]

统性研究结果相一致。推转壳模型的计算结果也较好地重现了$^{73}$Ge中$g_{9/2}$正宇称带回弯延迟现象。在$\hbar\omega \approx 0.80$ MeV时，中子、质子同时顺排，使得原子核形状从$\gamma \approx -36°$变为$\gamma \approx 60°$，因而出现集体性减弱的现象。而在$(f_{5/2})^{-1}$负宇称带中，在$\hbar\omega \approx 0.43$ MeV时，便出现了回弯现象。理论计算结果显示，该现象是由于中子顺排导致的[12]。

对于$^{75}$Ge，为了研究其激发态结构，我们做了两个实验。一个是在中国原子能科学研究院HI-13串列加速器国家实验室开展的$^{32}$S+$^{76}$Ge重离子深度非弹实验，探测阵列主要包括8个HPGe和8块DSSD（Double Sided Silicon-Strip Detector）探测器，分别用来测量反应中出射的γ射线和带电粒子。一个是在南非iThemba LABS（Laboratories for Accelerator Based Sciences）国家实验室开展的$^{74}$Ge(α，1n2p)$^{75}$Ge重离子熔合蒸发反应实验，探测阵列由8个Clover和两个LEPS（Low-Energy Photon Spectrometer）组成。实验大大扩展了$^{75}$Ge的能级纲图，首次发现了两个负宇称和一个正宇称集体带结构[34]。通过对集体带的结构特征进行分析以及与邻近奇质量同中子素的系统学比较，这三个集体带的组态分别被指定为$p_{1/2}$、$f_{5/2}$和$g_{9/2}$。

我们利用组态约束的势能面模型（Potential Energy Surface，PES）对$^{71,73,75,77}$Ge的基态形变开展了系统研究，分析表明，$^{71,73}$Ge的基态具有近扁椭形状，而$^{75,77}$Ge的基态形状为近长椭，同时三轴自由度在这些奇质量Ge同位素中也起着重要作用。基于PES计算给出的形变参数，利用三轴粒子转子模型（Particle Rotor Model，PRM）计算了$^{75}$Ge的集体激发能谱，理论结果与实验数据符合得很好，进一步支持了对$^{75}$Ge中三个新发现集体带的组态指定及其形变计算结果。对于奇质量Ge同位素，研究表明，其扁椭到长椭的形状相变发生在$^{75}$Ge[34]。

对于$^{71}$Ge，我们在南非iThemba LABS国家实验室通过$^{74}$Ge(α，α3n)$^{71}$Ge熔合蒸发反应布居了其高自旋态。首次建立了$^{71}$Ge核中的集体带结构，发现了建立在15/2$^-$态上的集体带到$\nu g_{9/2}$带两条增强的$E$1跃迁，而且该集体带呈现良好的集体转动性，表明15/2$^-$态可能具有八极特征（$g_{9/2}$粒子与3$^-$态的耦合）[35]。通过将$^{71}$Ge邻近的奇$A$核Ge同位素中15/2$^-$态与9/2$^+$态的相对能量与邻近偶偶核Ge同位素的3$^-$态的激发能系统的比较，发现二者具有相似的演化规律，且$^{71}$Ge的结果在目前所知的奇$A$核Ge同位素中最小，见图4(a)。我们将该带19/2$^-$态的B($E$1)/B($E$2)比值与邻近奇$A$核Ge同位素的相似能级和邻近偶偶核3$^-$带的5$^-$态B($E$1)/B($E$2)，以及已知的典型八极形变核$^{218,220}$Ra的B($E$1)/B($E$2)比值进行了比较，见图4(b)。结果显示：$^{71}$Ge中的B($E$1)/B($E$2)比值远大于邻近Ge同位素的值，且与$^{218,220}$Ra的实验结果可以比拟。我们同时比较了$^{71}$Ge中建立在15/2$^-$态上的集体带与$^{70,72}$Ge的3$^-$带和$^{74}$Se的八极带激发能与$I(I+1)$的演化规律，结果表明，$^{71}$Ge的这个带和$^{74}$Se八极带类似，与稳定转子的演化规律一致[35]。

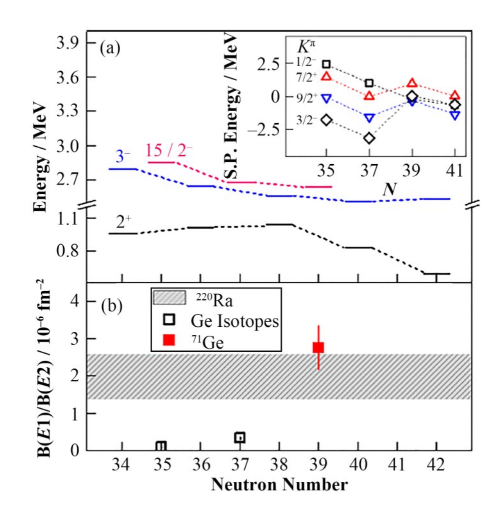



图4 (a) 奇$A$的Ge同位素中15/2$^-$相对于9/2$^+$的能量与偶偶Ge同位素中3$^-$能量的系统学，(b) 奇$A$的Ge同位素中19/2$^-$态的B($E$1)/B($E$2)实验值和典型八极形变核$^{220}$Ra的B($E$1)/B($E$2)的实验值比较[35]
(a)中插图是奇$A$的Ge同位素中$g_{9/2}$和$p_{3/2}$轨道的中子单粒子能级

**Fig.4** (a) Excitation energies of the 15/2$^-$ states (relative to the 9/2$^+$ states) in odd-$A$ Ge isotopes, and the 3$^-$ and 2$^+$ states in even-$A$ Ge isotopes, (b) the experimental B($E$1)/B($E$2) branching ratios of 19/2$^-$ state in $^{71}$Ge in comparison with experimental values in the neighboring odd-$A$ Ge isotopes, and the octupole-deformed nucleus $^{220}$Ra. The average B($E$1)/B($E$2) branching ratio with experimental uncertainty for the octupole band in $^{220}$Ra is displayed as the shaded region[35]. Inset in (a): The neutron single-particle levels originating from the $g_{9/2}$ and $p_{3/2}$ orbitals in odd-$A$ Ge isotopes.

我们进一步采用多维约束的相对论平均场理论（Multi-Dimensional Constraint Relativistic Mean-Field，MDC-RMF）和基于双核模型（Di-Nuclear System，DNS）新发展的半微观集团模型研究了$^{71}$Ge的八极特性。图4(a)中的内插图给出了理论计算的奇$A$的Ge同位素中g9/2和p3/2中子单粒子能级随中子数的变化关系。可以看出，这些单粒子能级之间的间距随着中子数的增加而减小，在$^{71}$Ge附近最小，导致该核中出现强烈的八极关联。同时，MDC-RMF计算结果显示，$^{71}$Ge在八极自由度方向很软。集团模型很好地再现了$^{71}$Ge和$^{74}$Se八极带的实验激发能以及$^{74}$Se核八极带能级间跃迁的B($E$2)值。

## 2 轻丰中子核的集团结构研究

原子核通常被看作深束缚的质子-中子组成的准球形体系。但随着原子核激发能、自旋、同位旋等的升高，该体系的形状和内在结构可以发生很大的变化，其中一个重要的现象是出现奇特的集团或分子结构[3,36]。通常认为，集团结构倾向于在对应的分离阈附近发生，被称为Ikeda阈规则[37]。例如，$^{12}$C中在激发能7.65 MeV左右的$0_2^+$态，就是典型的3-α集团结构态(也称为Hoyle态)，它对自然界碳以上元素的生成有关键的作用[38]。多年来，对原子核集团(分子)结构的研究中揭示了一些重要的物理概念，如阈规则[37]、低密度背景下的核子强关联[3,36]、形成类似玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein Condensation，BEC)的状态[38-39]、核结构的波包方式描写[40-41]、由价核子分布驱动的量子态正交性质[41]等。

相对于大量的理论工作，实验上对集团结构的清晰证据还很有限。这主要是由于高激发或远离稳定线核态的产生以及集团衰变的多重符合测量相对比较困难[3,36]。需要强调的是，集团衰变测量特别重要。这是因为高激发区域单粒子性质的态密度极大，很难从单举测量(缺损质量测量)中挑选出集团结构状态；而集团衰变符合测量则只对集团结构敏感，选择性很强。另外，从衰变粒子的能动量可以直接重建母态的激发能(不变质量法)和自旋(角关联方法)，这对于构建分子转动带是必需的[42-43]。近年来，我们开展了原子核集团和分子结构的系列实验研究，这里介绍部分在中国原子能科学研究院HI-13串列加速器上开展的实验测量和相关的物理研究。

对于双α核心的丰中子$^{10}$Be，我们通过实验测定了一个重要分子态的谱因子。由于$^{8}$Be基态就是典型的双α集团结构，因此，在$^{8}$Be基础上加入价中子的Be同位素很可能出现双α核心的分子结构[36]。其中对$^{10}$Be已经有比较多的理论和实验研究，特别是发现了σ-键的$^{4}$He+$^{6}$He分子转动带，其转动惯量极大，成员为6.18 MeV($0_2^+$)、7.54 MeV($2_3^+$)和10.15 MeV($4_1^+$)[36,44-45]。其中，6.18 MeV态是束缚态，而7.54 MeV态是离分离域(7.41 MeV)非常近的$^{4}$He+$^{6}$He构型的共振态。由于近阈的α粒子穿透库伦位垒的概率极小，实验测量这个态的集团衰变分支比十分困难。按照此前测量结果推出的这个态的集团结构谱因子(等效于集团形成概率)达到约51(19)[46]，这显然是不可能的。

为了澄清这一困难的问题，我们课题组利用HI-13串列加速器提供的45 MeV的$^{9}$Be束流轰击$^{9}$Be靶(166 μg·cm$^{-2}$)，通过单核子转移反应布居$^{10}$Be的激发态。设置了6套硅微条带电粒子望远镜测量$^{10}$Be集团共振态的衰变产物α+$^{6}$He。这些望远镜具有优越的轻粒子分辨能力，同时具有很好的位置分辨能力，从而适合多粒子符合测量。通过动量守恒推出反冲粒子$^{8}$Be的能量，从而构建反应-衰变过程$^{9}$Be($^{9}$Be，$^{10}$Be$^{*}$→α+$^{6}$He)$^{8}$Be的$Q$-值谱，从中区分末态粒子状态(如$^{8}$Be的基态和激发态)。取各个末态粒子均处于基态的状况，既可以开展后续的$^{10}$Be共振态重建和分析。完整的实验描述见文献[16]。

$^{10}$Be中7.54 MeV共振态高于分离域只有约130 keV，因此，α粒子穿透库伦位垒的概率极小，准确测量的关键在于有效排除本底。为此，我们在图5(a)给出了反应$Q$值和通过衰变粒子重建的$^{10}$Be激发能二维谱，从图5可以看出，可能有来自二维的相互独立的本底干扰。为此，可以通过投影谱(图5(b、c))，分别在两维上拟合去除本底，并通过图5(d)做验证。在此基础上获得有效峰计数为32±10，误差为统计性质，包含本底涨落的贡献。

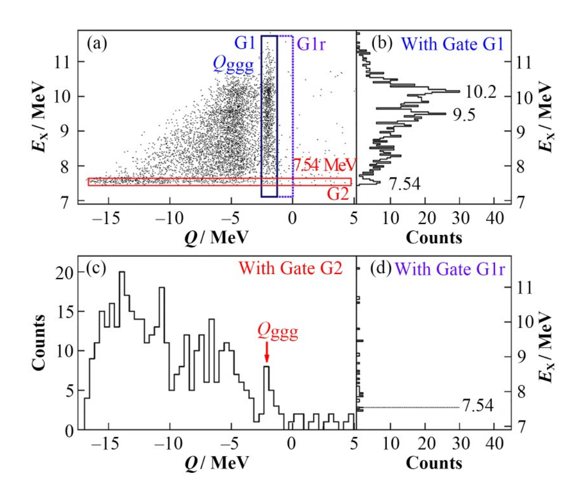



**图5** 从α+$^{6}$He符合测量中作出的关联谱[16]
(a) 重建的$^{10}$Be激发能$E_x$和反应$Q$值的二维谱，(b) 在$Q_{ggg}$条件下(G1方框)投影的$E_x$谱；(c) 在$E_x$处于7.54 MeV附近时(G2方框)投影的$Q$值谱；(d) 在$Q$值取在$Q_{ggg}$右侧(G1r方框)条件下的$E_x$谱

**Fig.5** Spectra deduced from the detected α+$^{6}$He pairs[16]
(a) Two-dimensional plot for the $E_x$ versus the $Q$ value, (b) The projected $E_x$ spectrum for the $Q$ value around $Q_{ggg}$ (gate G1), (c) The projected $Q$-value spectrum for $E_x$ around 7.54 MeV (gate G2), (d) The projected $E_x$ spectrum for $Q$ values at the right side of $Q_{ggg}$ (gate G1r)

上述$^{10}$Be的7.45 MeV能态，还有另一个很强的中子衰变道n+$^{9}$Be。只有对这个道也做出定量分析，才能得到集团衰变的分支比。实验上，是通过在前角区测定$^{9}$Be，在大角度区测出反冲的$^{8}$Be(从双α重建)，从而推出衰变的中子能动量，再进而重建$^{10}$Be激发态。将这样得出的7.54 MeV共振态的计数，与

前面集团衰变得出的计数比较，并做探测效率修正，即可抽取集团衰变道的分支比。结果为(4.04±1.26)×10⁻⁴，其中误差为随机性质。按照常用的R-矩阵方法，即可推出这个态的集团结构谱因子分布范围2.56(80)到0.87(27)(对应选取的道半径1.4~1.8 fm)[16]。这个结果与理论估算基本一致，也与对应的分子转动带的另两个成员(6.18 MeV($0_2^+$)和10.15 MeV($4_1^+$))的集团结构谱因子自洽。由此，从实验上比较完整地确定了$^{10}$Be中的分子转动带，提供了轻丰中子核集团结构的清晰证据。

比Be重一点的偶偶核素是C同位素。对$^{12}$C的研究已经比较充分，特别是其7.65 MeV激发能的共振态，也就是著名的Hoyle态，被认为是类似BEC的状态[38]。对于三α核心可以形成的链状结构，理论预言应该出现在丰中子的$^{14}$C和$^{16}$C等核素。其中，价中子在不同分子轨道上的布居以及量子态的正交关系促使在高级发能区出现更加奇异的结构[47−48]。比如，在$^{14}$C和$^{16}$C中，都可以依次出现基带、三角形分子转动带、含π构型的链状分子转动带、纯σ构型链状分子转动带等[47−48]。其中，π构型指价中子主要分布在核心连接轴的两侧，而σ构型指价中子主要分布在核心之间。显然，后者会使得核心间的距离加大，在链状分布情况下使得链的长度达到最大，也就是转动惯量达到最大，出现最为奇特的结构[47−49]。

在实验探测$^{14}$C和$^{16}$C的集团衰变时，会碰到新的问题，就是衰变末态(比如$^x$Be+$^{4,6}$He)中$^{10}$Be、$^{12}$Be等可以处于多个束缚的激发态。由于对Be同位素的研究已经比较充分，就有可能利用选择性衰变路径来识别母态的结构。比如，$^{10}$Be的第一激发态(3.14 MeV，$2^+$)主要是单粒子性质，而6.18 MeV($0_2^+$)态主要是σ键分子结构。理论预言$^{14}$C中在约22 MeV以上可以出现特别奇特的σ键链状分子结构。它的一个区分度很高的特点就是主要衰变到$^{10}$Be的6.18 MeV($0_2^+$)态，而不容易衰变到能量更低的$^{10}$Be基态和第一激发态(3.14 MeV)。这种反常衰变路径提供了识别$^{14}$C中σ键链状分子结构的一个重要方法[47]。基于此，我们在HI-13串列加速器实验室提出了研究$^{14}$C中链状分子结构的实验。实验采用45 MeV的$^9$Be束流，通过转移反应$^9$Be($^9$Be，$^{14}$C$^*$→$^{10}$Be+α)$^4$He布居$^{14}$C的高激发态，测量后者的集团衰变。实验成功的关键是获得高分辨的反应$Q$值谱，从而准确识别衰变路径。图6给出本次实验的结果及其与此前其他实验的比较。

以准确区分的$Q$值峰为条件，可以通过衰变产物$^{10}$Be+α重建$^{14}$C的集团结构共振态。从中可以提取出该共振态到不同$^{10}$Be末态的计数，通过探测效率修正，即得到相对衰变分支比。图7显示了对于本实验测量的21.4 MeV和22.5 MeV两个共振态的结果[15]。其中，21.4 MeV的态以正常衰变到$^{10}$Be基态和第一激发态为主。此前实验[51]对于21.4 MeV共振态的结果也在图7中给出作为比较。而本实验测量的22.5 MeV的态则明显反常以衰变到$^{10}$Be的~6 MeV态为主。与理论预言[47]相结合，可以认为这个态具有纯σ构型的线性链状分子结构的特征，值得深入研究，如进一步测定其自旋宇称。

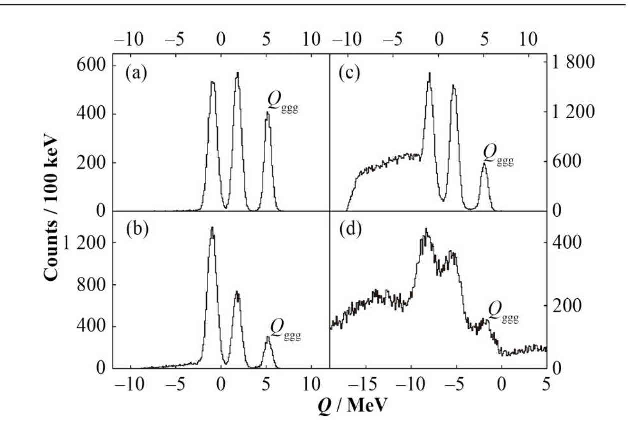



**图6** $^9$Be($^9$Be,$^{14}$C$^*$→$^{10}$Be+α)$^4$He反应的$Q$值谱[15]
(a) 采用识别的$^{10}$Be和α，(b) 采用识别的$^{10}$Be和非识别的α，(c) 采用识别的α和非识别的$^{10}$Be，(d) 此前其他实验的结果[50]
**Fig.6** $Q$-value spectrum from the present experiment for different data sets[15]
(a) Identified $^{10}$Be and identified α, (b) Identified $^{10}$Be and unidentified α, (c) Identified α and unidentified $^{10}$Be, (d) Spectrum obtained from previous $^7$Li($^9$Be,$^{10}$Be+α)$^2$H experiment [50]

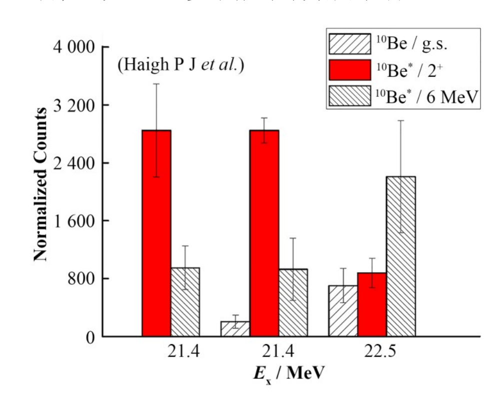



**图7** $^{14}$C的21.4 MeV和22.5 MeV的共振态衰变到$^{10}$Be(不同量子态)+α的相对分支比[15]
**Fig.7** $^{14}$C→$^{10}$Be +α relative branching ratio for 21.4-MeV and 22.5-MeV resonances in $^{14}$C with respect to three sets of final states in $^{10}$Be obtained from the present measurement[15]

对于更重的核体系，如O同位素，其集团或分子结构一般首先表现为很不对称的C碎片加α粒子的形式。例如对于$^{18}$O，我们通过多核子转移反应$^9$Be($^{13}$C，$^{18}$O$^*$)α布居了其集团共振态，测量其非对称集团衰变产物$^{14}$C+α。通过不变质量(Invariant Mass，

IM）和缺失质量（Missing Mass，MM）测量相结合，我们获得了 $^{18}$O 中 14 个共振态的集团衰变分支比。同时也利用角关联方法定出 10.3 MeV 能态的自旋宇称为 $4^+$（图 8）。这些结果支持在 $^{18}$O 中存在正宇称的 $^{14}$C+α 分子转动带，但没能确定对应的负宇称带。具体测量和分析见文献[17]。

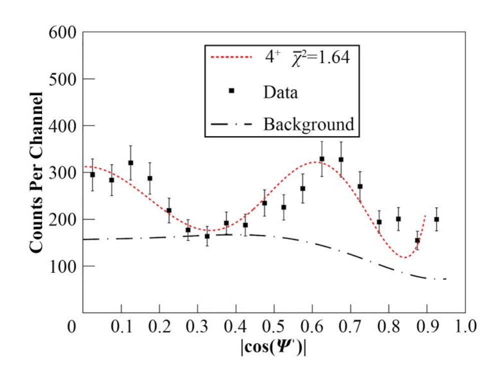



**图 8** $^{18}$O 中 10.3 MeV 态衰变产物的角关联谱[17]
红色点线表示 4 级的勒让德多项式，长点虚线表示本底，均做了探测效率修正。图中 $\bar{\chi}^2$ 值表示拟合优度

**Fig.8** The angular correlation for the 10.3 MeV state, compared with the Legendre polynomials of order 4 (the red dotted line)[17]. A uniformly distributed background is assumed for the uncorrelated component (the long dot-dashed line). All the theoretical angular distributions are corrected for the detection efficiency. The corresponding reduced $\bar{\chi}^2$ is also indicated in this plot.

## 3 基于国内 BRIF 装置的共线激光谱技术

原子核的电磁性质会影响核外电子的运动，引起核外电子能级的超精细结构分裂和同位素移动。实验上通过测量核外电子能级的微小分裂和移位就可以核模型无关地精确提取原子核的电磁基本性质，如自旋、磁矩、电四极矩以及电荷半径等。激光核谱学就是利用核外电子能级的微小变化来测量和研究原子核性质和结构的一种多学科交叉方法。这种方法在认识近 1 000 多个不稳定核性质和奇特结构的研究中发挥了重要作用[52−53]。近期，此方法在放射性分子谱测量中的首次成功应用，有望拓展对 CP（Charge conjugation and Parity）破缺相关的基本对称性等的研究。

激光核谱学测量超精细结构谱的方式主要有两类，即激光诱导荧光和激光共振电离。基于这两类方法，国际上发展了多种激光核谱实验技术，如基于激光诱导荧光的共线激光谱技术和基于激光共振电离的在源激光谱技术等[54]。在目前已经基于激光核谱学研究的近 1 000 个原子核中，利用共线激光谱技术研究的原子核占 80% 以上，这主要得益于共线激光谱的高分辨优势[52]。源于原子核与核外电子相互作用的超精细结构能级间距一般较小，例如在轻中质量区原子核外电子的超精细结构能级间距一般在几十至几百 MHz 范围，重核区的超精细结构能级间距一般大于 GHz。可见，要实现对整个核素版图中各质量区原子核外电子超精细结构能级的测量，激光谱学实验技术的分辨率是关键。

共线激光谱采用激光与高速（一般几十 keV）运动的原子或离子束共线的方式，可极大地压制能量离散带来的多普勒展宽。图 9 给出了利用共线激光谱技术压制多普勒展宽的原理和效果图。当一确定能量离散 $\delta E$ 的离子被加速到能量 $E$ 后，离子速度的不确定度为 $\delta v = \delta E/\sqrt{2mE}$。因此，由于离子能量离散造成的观察谱线的多普勒展宽变为：

$$\delta \nu = \nu_0 \frac{\delta E}{\sqrt{2Emc^2}} \quad (1)$$

式中：$\nu_0$ 为观察的核外电子能级的跃迁频率；$m$ 为离子质量[52]。由式（1）很容易理解，随着离子束能量 $E$ 的逐步增大，多普勒展宽 $\delta\nu$ 逐渐减小。当离子的能量被加速到几十 keV 时，由能量离散带来的谱线的多普勒展宽可降至几十 MHz（图 9（a）），这与谱线的自然展宽处于同一量级。为了更直观地对比，图 9（b）给出了能量离散确定时，当离子束能量为~0 keV 和~20 keV 时，实验测量的超精细结构谱[55]。因此，正是由于共线激光谱高分辨的优势，多年来，这种实验方法在国际上的放射性核束装置上广泛应用和部署。

此前，我国的放射性核束装置上还没有建立用于不稳定原子核性质和结构研究的共线激光谱技术。2021 年，我们在中国原子能科学研究院的北京放射性核束装置 BRIF 上发展了国内首个用于不稳定核研究的共线激光谱实验终端[18−19]。整个实验终端的示意图如图 10（红色阴影以外区域）所示。BRIF 装置上共线激光谱终端的建设过程包括：1）2021 年 9 月底开始进行共线激光谱系统支架和真空束流管道的安装；2）10 月中旬开始，将共线激光谱核心仪器（如激光系统、高压系统、电荷交换和电压扫描系统、探测系统、获取系统和真空系统等）由北京大学亚原子粒子探测实验室运至 BRIF 装置现场安装和调试；3）10 月下旬进行在线实验前期的各系统连调；4）11 月上旬在 BRIF 装置上开展了国内首次不稳定核在线激光核谱实验。

如图 10 所示，中国原子能科学研究院的回旋加速器产生的 100 MeV 质子束轰击 CaO 靶，反应产物 K 同位素经 BRIF 的表面离子源电离、提取后被加速至 60 keV 并被质量分离。经质量分离选择的特定质量数的 K 同位素（例如不稳定束 $^{38}$K 和稳定束 $^{39}$K）经 80°偏转进入共线激光谱束流线[19]。BRIF 提供的

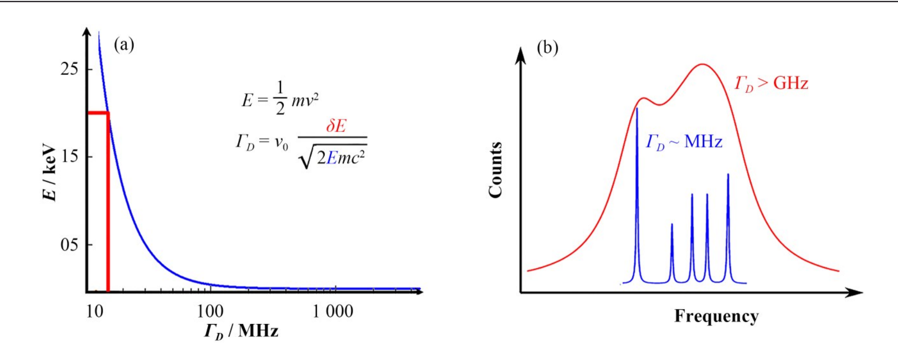



**图9**　利用共线激光谱技术压制多普勒展宽的原理(a)和效果图(b)[52]

**Fig.9**　The principle (a) and result (b) of suppression of Doppler broadening of the spectral linewidth observed using the collinear laser spectroscopy method[52]

离子束与激光束在共线束流线上反共线传输。离子束经由四级聚焦等束流光学系统调节和整形后进入电荷交换室。在电荷交换室，离子束经由电压扫描和电荷交换过程后变为速度连续变化（通过多普勒效应等效激光频率连续变化）的原子束。在电荷交换过程中，未被中个性化为原子的离子被电荷交换室后的偏转电极偏走。中性化的原子在荧光探测的相互作用区被频率固定的激光束共振激发。处于激发态的$^{38,39}$K原子退激发射的荧光由探测系统收集后被数据获取系统记录和保存。通过记录荧光光子强度与扫描电压的关系即可获得待测核外电子超精细结构谱。

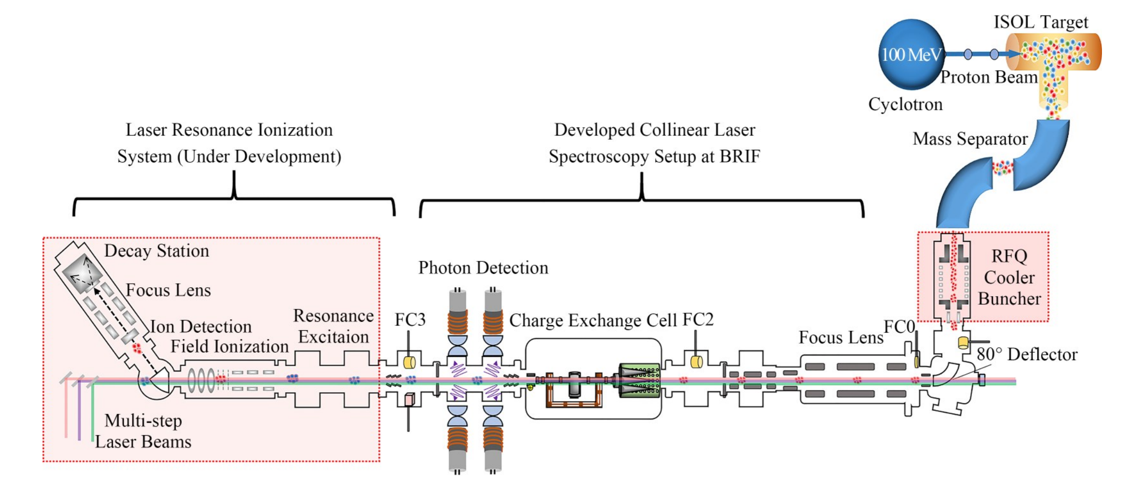



**图10**　正在BRIF放射性核束装置上发展的共线共振电离谱设备，包含已经建成的共线激光谱终端[19]和正在建设中的RFQ冷却聚束器以及激光共振电离谱[57]（红色阴影部分）

**Fig.10**　Collinear laser spectroscopy setup [19] (developed at the BRIF facility), as well as the RFQ cooler buncher and laser resonance ionization spectroscopy (under development) [57] (red shaded area)

图11为在BRIF装置上开展的第一个共线激光谱实验测量的$^{38,39}$K原子的D1跃迁$4s\ ^2S_{1/2} \rightarrow 4p\ ^2P_{1/2}$的超精细结构谱图[19−20]。对图示超精细结构谱进行分析和拟合就可以得到与原子核自旋和磁矩相关的电偶极超精细结构常数，以及与原子核电荷半径相关的同位素移位。以此就可以计算$^{38,39}$K原子核的磁矩和电荷半径。实验结果与已有的文献值在误差范围内符合得很好[19]。基于实验测量的超精细结构谱中共振峰的计数，我们计算的此共线激光谱实验终端针对不稳定核的实验探测效率与国际上同类型设备处于同等先进水平。本次实验中BRIF装置提供的放射性核束为连续束，且束流的能量离散约为20 eV。较大的能量离散直接影响了图11中观察的共振峰的分辨率，造成提取的原子核基本性质数据的误差偏大。

目前，国际上开展共线激光谱实验普遍采用的是脉冲束流，这能显著地压制由激光散射光子造成的光电倍增管的探测本底，实验探测灵敏度也会显著提升。因此，目前我们正在进一步发展图10中红色阴影所示的射频四级冷却聚束器（Radiofrequency Quadrupole，RFQ）和共振电离谱技术[56−57]。RFQ可实现降低束流能量离散的功能，将有利于提高共线激光谱实验测量的谱分辨率。RFQ也可以将连续束流转换为脉冲束流，提高共线激光

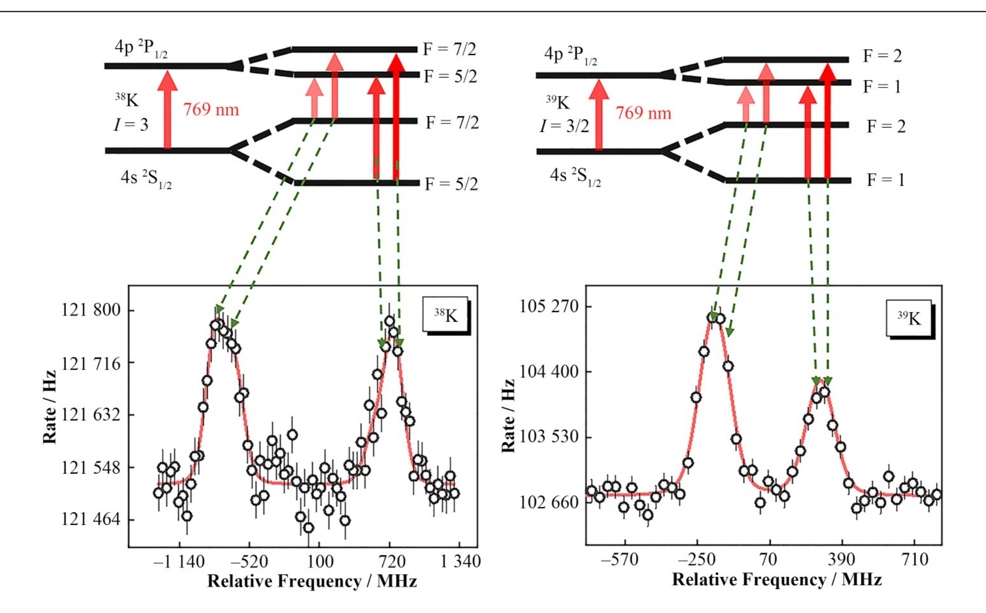



**图11** BRIF装置上通过共线激光谱测量的$^{38,39}$K的超精细结构谱[19]

**Fig.11** Hyperfine structure spectra of $^{38,39}$K measured using collinear laser spectroscopy at the BRIF facility[19]

谱实验测量的灵敏度，用于低产额($10^{3-4}$ ion·s$^{-1}$)不稳定核的研究。而共线基础上的共振电离，采用脉冲束流与多步脉冲激光共振电离探测离子的方式测量待测核外电子的超精细结构谱，直接避免了光子探测，将显著提升实验测量的灵敏度。此技术是由欧洲核子研究中心ISOLDE的CRIS(Collinear Resonance Ionization Spectroscopy)合作团队发展的，目前已经实现了对极端丰中子核$^{78}$Cu($Z$=29)的高分辨(谱半高宽：75 MHz)和高灵敏度(核素产额：20 ion·s$^{-1}$)的测量[58−59]，处于国际引领地位。图11所示结合RFQ和共振电离的共线共振电离谱设备将被用于BRIF装置上开展不稳定核的基本性质和奇特结构研究。目前已经计划研究的是丰质子Na和Al同位素的电荷半径。

## 4 总结与展望

本文举例介绍了北京大学实验核物理团队在北京HI-13串列加速器上开展的系列研究工作，包括基于在束γ谱学的$A$≈70质量区Ge同位素形状演化研究，基于核反应实验的轻丰中子核($^{10}$Be，$^{14}$C，$^{18}$O)中集团结构研究，以及基于BRIF装置发展的共线激光谱设备和首次在线激光核谱实验。

目前，北京串列加速器核物理国家实验室的BRIF团队正在发展铀靶技术，已经取得阶段性重要进展，可提供了更多中等质量区的放射性核素。北京大学实验核物理团队将基于新的条件和机遇，继续开展不稳定奇特性质和结构的研究。

**致谢** 感谢中国原子能科学研究院组织的“北京串列加速器核物理国家实验室35周年暨张焕乔院士学术思想研讨会”。

**作者贡献声明** 华辉、叶沿林、杨晓菲共同完成文章整体构思和撰写、图片绘制、文献整理等。所有作者对文章进行检查与修改。

## 参考文献

1 叶沿林, 杨晓菲, 刘洋, 等. 与HIAF装置相关的放射性核束物理研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, **50**(11): 112003. DOI: 10.1360/SSPMA-2020-0282.
YE Yanlin, YANG Xiaofei, LIU Yang, *et al*. Radioactive ion beam physics related to HIAF[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, **50**(11): 112003. DOI: 10.1360/SSPMA-2020-0282.

2 Zhou L, Wang S M, Fang D Q, *et al*. Recent progress in two-proton radioactivity[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(8): 105. DOI: 10.1007/s41365-022-01091-1.

3 Liu Y, Ye Y L. Nuclear clustering in light neutron-rich nuclei[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(12): 184. DOI: 10.1007/s41365-018-0522-x.

4 Borge M J G, Jonson B. ISOLDE past, present and future [J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2017, **44**(4): 044011. DOI: 10.1088/1361-6471/aa5f03.

5 Yano Y, Motobayashi T. Radioactive isotope beam factory at RIKEN (RIBF)[J]. Nuclear Physics News, 2007, **17**(4): 5－10. DOI: 10.1080/10506890701750368.

6 Glasmacher T, Sherrill B, Nazarewicz W, *et al*. Facility

for rare isotope beams update for *Nuclear Physics News* [J]. Nuclear Physics News, 2017, **27**(2): 28 – 33. DOI: 10.1080/10619127.2017.1317176.

7 Eschke J. International facility for antiproton and ion research (FAIR) at GSI, Darmstadt[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2005, **31**(6): S967 – S973. DOI: 10.1088/0954-3899/31/6/041.

8 Yang Y, Sun L T, Zhai Y H, *et al*. Heavy ion accelerator facility front end design and commissioning[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2019, **22**(11): 110101. DOI: 10.1103/physrevaccelbeams.22.110101.

9 Niu X F, Bai F, Wang X J, *et al*. Cryogenic system design for HIAF iLinac[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(12): 178. DOI: 10.1007/s41365-019-0700-5.

10 Nan W, Guo B, Lin C J, *et al*. First proof-of-principle experiment with the post-accelerated isotope separator on-line beam at BRIF: measurement of the angular distribution of $^{23}$Na+$^{40}$Ca elastic scattering[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(5): 53. DOI: 10.1007/s41365-021-00889-9.

11 Sun J J, Shi Z, Li X Q, *et al*. Spectroscopy of $^{74}$Ge: from soft to rigid triaxiality[J]. Physics Letters B, 2014, **734**: 308 – 313. DOI: 10.1016/j.physletb.2014.05.069.

12 Sun J J, Xu C, Li X Q, *et al*. Band crossing and shape evolution in $^{73}$Ge[J]. Physical Review C, 2015, **92**(5): 054302. DOI: 10.1103/physrevc.92.054302.

13 Luo D W, Wu H Y, Li Z H, *et al*. Performance of digital data acquisition system in gamma-ray spectroscopy[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(8): 79. DOI: 10.1007/s41365-021-00917-8.

14 Wu H Y, Li Z H, Tan H, *et al*. A general-purpose digital data acquisition system (GDDAQ) at Peking University [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **975**: 164200. DOI: 10.1016/j.nima.2020.164200.

15 Li J, Ye Y L, Li Z H, *et al*. Selective decay from a candidate of the σ-bond linear-chain state in $^{14}$C [J]. Physical Review C, 2017, **95**(2): 021303. DOI: 10.1103/physrevc.95.021303.

16 Jiang W, Ye Y L, Lin C J, *et al*. Determination of the cluster-decay branching ratio from a near-threshold molecular state in $^{10}$Be[J]. Physical Review C, 2020, **101**(3): 031304. DOI: 10.1103/physrevc.101.031304.

17 Yang B, Ye Y L, Feng J, *et al*. Investigation of the $^{14}$C+α molecular configuration in $^{18}$O by means of transfer and sequential decay reaction[J]. Physical Review C, 2019, **99**(6): 064315. DOI: 10.1103/physrevc.99.064315.

18 Bai S W, Yang X F, Wang S J, *et al*. Commissioning of a high-resolution collinear laser spectroscopy apparatus with a laser ablation ion source[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(1): 9. DOI: 10.1007/s41365-022-00992-5.

19 Wang S J, Yang X F, Bai S W, *et al*. Construction and commissioning of the collinear laser spectroscopy system at BRIF[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, **1032**: 166622. DOI: 10.1016/j.nima.2022.166622.

20 Liu Y C, Yang X F, Bai S W, *et al*. Control and data acquisition system for collinear laser spectroscopy experiments[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(3): 38. DOI: 10.1007/s41365-023-01197-0.

21 Andreyev A N, Huyse M, Van Duppen P, *et al*. A triplet of differently shaped spin-zero states in the atomic nucleus 186Pb[J]. Nature, 2000, **405**(6785): 430 – 433. DOI: 10.1038/35013012.

22 Ćwiok S, Heenen P H, Nazarewicz W. Shape coexistence and triaxiality in the superheavy nuclei[J]. Nature, 2005, **433**(7027): 705 – 709. DOI: 10.1038/nature03336.

23 Grahn T, Dewald A, Möller O, *et al*. Collectivity and configuration mixing in $^{186,188}$Pb and $^{194}$Po[J]. Physical Review Letters, 2006, **97**(6): 062501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.062501.

24 Paul E S, Twin P J, Evans A O, *et al*. Return of collective rotation in $^{157}$Er and $^{158}$Er at ultrahigh spin[J]. Physical Review Letters, 2007, **98**(1): 012501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.012501.

25 Bender M, Bonche P, Heenen P H. Shape coexistence in neutron-deficient Kr isotopes: constraints on the single-particle spectrum of self-consistent mean-field models from collective excitations[J]. Physical Review C, 2006, **74**(2): 024312. DOI: 10.1103/physrevc.74.024312.

26 Kotliński B, Czosnyka T, Cline D, *et al*. Heavy-ion coulomb excitation of $^{72}$Ge[J]. Nuclear Physics A, 1990, **519**(3): 646 – 658. DOI: 10.1016/0375-9474(90)90451-Q.

27 Toh Y, Czosnyka T, Oshima M, *et al*. Coulomb excitation of $^{74}$Ge beam[J]. The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei, 2000, **9**(3): 353 – 356. DOI: 10.1007/s100500070019.

28 Toh Y, Czosnyka T, Oshima M, *et al*. Multiple Coulomb excitation of a $^{76}$Ge beam[J]. Journal of Physics G:

Nuclear and Particle Physics, 2001, **27**(7): 1475 – 1480. DOI: 10.1088/0954-3899/27/7/307.

29 Lecomte R, Irshad M, Landsberger S, *et al*. Evidence of a spherical to prolate shape transition in the germanium nuclei[J]. Physical Review C, 1980, **22**(4): 1530 – 1533. DOI: 10.1103/physrevc.22.1530.

30 Lecomte R, Irshad M, Landsberger S, *et al*. Coulomb-excitation studies of $^{70}$Ge, $^{72}$Ge, $^{74}$Ge, and $^{76}$Ge[J]. Physical Review C, 1980, **22**(6): 2420 – 2423. DOI: 10.1103/physrevc.22.2420.

31 Sugawara M, Toh Y, Czosnyka T, *et al*. Multiple Coulomb excitation of a $^{70}$Ge beam and the interpretation of the $0_2^+$ state as a deformed intruder[J]. The European Physical Journal A, 2003, **16**(3): 409 – 414. DOI: 10.1140/epja/i2002-10110-1.

32 Xu C, Li X Q, Meng J, *et al*. Spectroscopy of $^{76}$Se: Prolate-to-oblate shape transition[J]. Physical Review C, 2015, **91**(6): 061303. DOI: 10.1103/physrevc.91.061303.

33 Toh Y, Chiara C J, McCutchan E A, *et al*. Evidence for rigid triaxial deformation at low energy in $^{76}$Ge[J]. Physical Review C, 2013, **87**(4): 041304. DOI: 10.1103/physrevc.87.041304.

34 Niu C Y, Dai A C, Xu C, *et al*. Spectroscopic study of the possibly triaxial transitional nucleus $^{75}$Ge[J]. Physical Review C, 2018, **97**(3): 034322. DOI: 10.1103/physrevc.97.034322.

35 Wang C G, Han R, Xu C, *et al*. First evidence of an octupole rotational band in Ge isotopes[J]. Physical Review C, 2022, **106**: L011303. DOI: 10.1103/physrevc.106.l011303.

36 von Oertzen W, Freer M, Kanada-En'yo Y. Nuclear clusters and nuclear molecules[J]. Physics Reports, 2006, **432**(2): 43 – 113. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.07.001.

37 Ikeda K, Takigawa N, Horiuchi H. The systematic structure-change into the molecule-like structures in the self-conjugate 4n nuclei[J]. Progress of Theoretical Physics Supplement, 1968, **E68**: 464 – 475. DOI: 10.1143/PTPS.E68.464.

38 Funaki Y, Horiuchi H, Tohsaki A. Cluster models from RGM to alpha condensation and beyond[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2015, **82**: 78 – 132. DOI: 10.1016/j.ppnp.2015.01.001.

39 Tohsaki A, Horiuchi H, Schuck P, *et al*. Alpha cluster condensation in $^{12}$C and $^{16}$O[J]. Physical Review Letters, 2001, **87**(19): 192501. DOI: 10.1103/PhysRevLett. 87.192501.

40 Suhara T, Kanada-En'yo Y. Cluster structures of excited states in $^{14}$C[J]. Physical Review C, 2010, **82**(4): 044301. DOI: 10.1103/physrevc.82.044301.

41 Baba T, Kimura M. Structure and decay pattern of the linear-chain state in $^{14}$C[J]. Physical Review C, 2016, **94**(4): 044303. DOI: 10.1103/physrevc.94.044303.

42 Yang Z H, Ye Y L, Li Z H, *et al*. Observation of enhanced monopole strength and clustering in $^{12}$Be[J]. Physical Review Letters, 2014, **112**(16): 162501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.162501.

43 Yang B A, Ye Y L, Lou J L, *et al*. Spin determination by in-plane angular correlation analysis in various coordinate systems[J]. Chinese Physics C, 2019, **43**(8): 084001. DOI: 10.1088/1674-1137/43/8/084001.

44 Kanada-En'yo Y, Horiuchi H, Doté A. Structure of excited states of $^{10}$Be studied with antisymmetrized molecular dynamics[J]. Physical Review C, 1999, **60**(6): 064304. DOI: 10.1103/physrevc.60.064304.

45 Lyu M J, Ren Z Z, Zhou B, *et al*. Investigation of $^{10}$Be and its cluster dynamics with the nonlocalized clustering approach[J]. Physical Review C, 2016, **93**(5): 054308. DOI: 10.1103/physrevc.93.054308.

46 Fortune H T, Sherr R. (sd)$^2$ states or superclusters in $^{10}$Be [J]. Physical Review C, 2011, **84**(2): 024304. DOI: 10.1103/physrevc.84.024304.

47 Baba T, Kimura M. Three-body decay of linear-chain states in $^{14}$C[J]. Physical Review C, 2017, **95**(6): 064318. DOI: 10.1103/physrevc.95.064318.

48 Baba T, Kimura M. Characteristic α and $^6$He decays of linear-chain structures in $^{16}$C[J]. Physical Review C, 2018, **97**(5): 054315. DOI: 10.1103/physrevc.97.054315.

49 Baba T, Liu Y, Han J X, *et al*. Pure σ-bond linear chain in $^{16}$C[J]. Physical Review C, 2020, **102**(4): 041302. DOI: 10.1103/physrevc.102.041302.

50 Soić N, Freer M, Donadille L, *et al*. $^4$He decay of excited states in $^{14}$C[J]. Physical Review C, 2003, **68**: 014321. DOI: 10.1103/physrevc.68.014321.

51 Haigh P J, Ashwood N I, Bloxham T, *et al*. Measurement of α and neutron decay widths of excited states of $^{14}$C[J]. Physical Review C, 2008, **78**: 014319. DOI: 10.1103/physrevc.78.014319.

52 Yang X F, Wang S J, Wilkins S G, *et al*. Laser spectroscopy for the study of exotic nuclei[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2023, **129**: 104005. DOI: 10.1016/j.ppnp.2022.104005.

53 白世伟, 杨晓菲. 基于不稳定核基本性质测量的原子核

结构研究[J]. 原子核物理评论, 2018, **35**(4): 382 – 389. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.35.04.382.

BAI Shiwei, YANG Xiaofei. Study of nuclear structure by the measurement of the ground state properties of unstable nuclei[J]. Nuclear Physics Review, 2018, **35**(4): 382 – 389. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.35.04.382.

54 刘永超, 白世伟, 杨晓菲. 用于核物理研究的精密激光谱技术的发展和展望[J]. 原子核物理评论, 2019, **36**(2): 161 – 169. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.02.161.

LIU Yongchao, BAI Shiwei, YANG Xiaofei. Development and prospect of precision laser spectroscopy techniques for nuclear physics study[J]. Nuclear Physics Review, 2019, **36**(2): 161 – 169. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.36.02.161.

55 Garcia Ruiz R F, Vernon A R, Binnersley C L *et al*., High-precision multiphoton ionization of accelerated laser-ablated species[J]. Physical Review X, 2018, **8**(4): 041005. DOI: 10.1103/PhysRevX.8.041005.

56 张鹏, 刘寅绅, 白世伟, 等. 用于不稳定原子核研究的共线激光谱仪研制进展[J]. 科学通报, 2023, **68**(9): 1054 – 1065. DOI: 10.1360/TB-2022-1116.

ZHANG Peng, LIU Yinshen, BAI Shiwei, *et al*. Progress on the development of the collinear laser spectroscopy setup for the study of unstable nuclei[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, **68**(9): 1054 – 1065. DOI: 10.1360/TB-2022-1116.

57 Zhang P, Hu H R, Yang X F, *et al*. Progress in the development of a collinear resonance ionisation laser spectroscopy setup[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2023, **541**: 37 – 41. DOI: 10.1016/j.nimb.2023.04.020.

58 de Groote R P, Billowes J, Binnersley C L, *et al*. Dipole and quadrupole moments of $^{73-78}$Cu as a test of the robustness of the $Z$=28 shell closure near $^{78}$Ni[J]. Physical Review C, 2017, **96**(4): 041302. DOI: 10.1103/PhysRevC.96.041302.

59 de Groote R P, Budincevic I, Billowes J, *et al*. Use of a continuous wave laser and pockels cell for sensitive high-resolution collinear resonance ionization spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2015, **115**: 132501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.132501.